

УДК 66.971

Computer Model Heat Exchange of the Continuous Casting and Extrusion Non-Ferrous Metals

Alexander P. Skuratov* and Alexander S. Potapenko

*Siberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

Received 17.07.2017, received in revised form 19.09.2017, accepted 20.10.2017

Based on the software complex Ansys CFX, a three-dimensional computer model of complex heat transfer in a continuous casting and pressing of non-ferrous metals has been developed. The features of constructing a computational grid and solving the system of differential energy equations for the processed metal and the elements of the installation are considered. The dynamics of the process of casting and pressing of aluminum alloy on an experimental laboratory installation is studied. Calculated temperatures of the metal and elements of the prototype of the installation are determined. An experimental estimation of reliability of modeling results is carried out and adequacy of the developed computer model is shown.

Keywords: installation, continuous casting and pressing, computer model, software complex Ansys, heat exchange, experiment, aluminum alloy.

Citation: Skuratov A.P., Potapenko A.S. Computer model heat exchange of the continuous casting and extrusion non-ferrous metals, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2017, 10(8), 1019-1030. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-8-1019-1030.

Компьютерная модель теплообмена в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов

А.П. Скуратов, А.С. Потапенко

*Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

На основе программного комплекса Ansys CFX разработана трехмерная компьютерная модель сложного теплообмена в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов. Рассмотрены особенности построения расчетной сетки и решения системы дифференциальных уравнений энергии для обрабатываемого металла и элементов установки. Изучена динамика

процесса литья и прессования алюминиевого сплава на опытной лабораторной установке. Определены расчетные температуры металла и элементов опытного образца установки. Проведена экспериментальная оценка достоверности результатов моделирования и показана адекватность разработанной компьютерной модели.

Ключевые слова: установка, непрерывное литье и прессование, компьютерная модель, программный комплекс Ansys, теплообмен, эксперимент, алюминиевый сплав.

Введение

Процессы обработки цветных металлов и сплавов включают в себя такие основные металлургические переделы, как литье заготовки, пластическую деформацию и термообработку. Тенденцией развития металлургической отрасли является совмещение этих переделов в одну непрерывную технологическую линию. Разнообразные модификации установок непрерывного литья и прессования цветных металлов получили широкое применение в металлообрабатывающей отрасли промышленности. Протекающие в данных установках термомеханические процессы имеют сложный характер, зависящий от выбранной технологии и особенностей их конструкции [1-3].

Основным технологическим параметром совмещенного процесса непрерывного литья и прессования (НЛиП) является промежуток времени между заливкой в инструмент расплава и входом закристаллизовавшегося металла под дугообразный сегмент с матрицей. Правильный выбор режима затвердевания слитка существенно влияет на формирование его структуры и свойств [4]. Величина указанного промежутка времени зависит от таких факторов, как начальная температура расплава, удаленность матрицы от места заливки, скорость движения канавки с металлом, интенсивность его охлаждения, размеры поперечного сечения и ряд др. [5]. Сложный характер влияния и взаимодействия этих факторов изучен недостаточно, что затрудняет решение задачи по повышению эксплуатационной надежности действующих и проектирование новых установок. Поэтому актуальна задача проведения на базе современных математических моделей сложного теплообмена теоретических исследований, направленных на изучение температурно-временных зависимостей процесса литья-прессования цветных металлов.

При решении задачи многофакторного исследования нового технического объекта требуется использование различных приближений и численных методов, позволяющих предсказать его поведение без проведения, как правило, дорогого и затруднительного эксперимента. В настоящее время в связи с развитием вычислительной техники и созданием современных программных продуктов стало возможным широкое применение такого вида теоретического исследования, как компьютерное моделирование [6-8].

Целью работы является разработка на базе программного комплекса ANSYS CFX компьютерной модели сложного теплообмена в установке НЛиП цветных металлов и сплавов с горизонтальным карусельным кристаллизатором.

Компьютерная модель экспериментальной установки

Экспериментальная установка НЛиП проста в конструктивном исполнении элементов, которые работают в условиях высоких тепловых нагрузок (рис. 1).

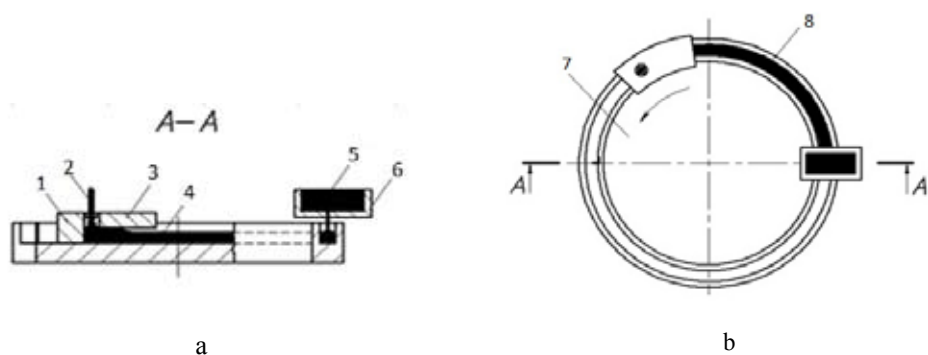


Рис. 1. Схема установки непрерывного литья и прессования с горизонтальным карусельным кристаллизатором: а – вид сбоку: 1 – упор матрицы; 2 – пресс-изделие; 3 – неподвижный дугообразный сегмент; 4 – затвердевший слиток; 5 – расплав металла; 6 – дозатор; б – вид сверху: 7 – колесо-кристаллизатор; 8 – кольцевая канавка

Fig. 1. Installation diagram of CCME with a horizontal carousel crystallizer pan: a – side view: 1 – matrix support; 2 – molding; 3 – stationary arc-shaped segment; 4 – hardened ingot; 5 – molten metal; 6 – batcher. b – top view; 7 – crystallizing wheel; 8 – annular groove

В рассматриваемой установке НЛиП жидкий металл 5 заливается через дозатор 6 в ручей 8 вращающегося рабочего колеса 7 и кристаллизуется до входа в камеру прессования, образованную на участке сопряжения ручки с матрицедержателем 3. Слиток 4, поступая в камеру прессования, выдавливается в отверстие матрицы 1 в виде пресс-изделия 2. Процессы заливки жидкого металла в канавку, его кристаллизация и прессование протекают непрерывно [9].

Для изучения тепловой работы установки разработана ее трехмерная компьютерная модель с использованием программного продукта Solid Works. Полученная геометрия импортирована в расчётный модуль Ansys CFX, где производится дальнейшая подготовка модели, для исследования тепловой работы установки (рис. 2).

Модель установки НЛиП построена на основе решения сопряженной задачи радиационно-конвективного теплообмена нескольких систем: «обрабатываемый металл – кристаллизатор»; «обрабатываемый металл – дугообразный сегмент»; «кристаллизатор – изоляционный слой – подшипники»; «кристаллизатор – воздушная прослойка – корпус»; «поверхность элемента установки – окружающая среда» [10].

Для создания расчётной сетки установка разбивается на 8 доменов. Домен корпус (CORPUS), состоящий из 181088 элементов. Домен кристаллизатор (CRISTALLYZER), состоящий из 1899260 элементов. Домен изоляционный слой (INSULATOR), состоящий из 38217 элементов. Домен дугообразный сегмент с матрицей (MATRIX), состоящей из 46705 элементов. Домен подставки дозатора (PODSTAVKA), состоящей из 251196 элементов. Домен воздушной прослойки между кристаллизатором и корпусом (SOLIDAIR). Домен обрабатываемого расплава разделён на два: (GROOVE) – участок от места заливки до дугообразного сегмента с матрицей (зона кристаллизации), состоящий из 1074651 элемента, и (GROOVE 2) – участок обрабатываемого металла, находящегося под дугообразным сегментом (зона прессования) и состоящий из 185461 элемента. Размер сетки в итоговом расчете всей модели составил 3.7 млн ячеек. Сетка

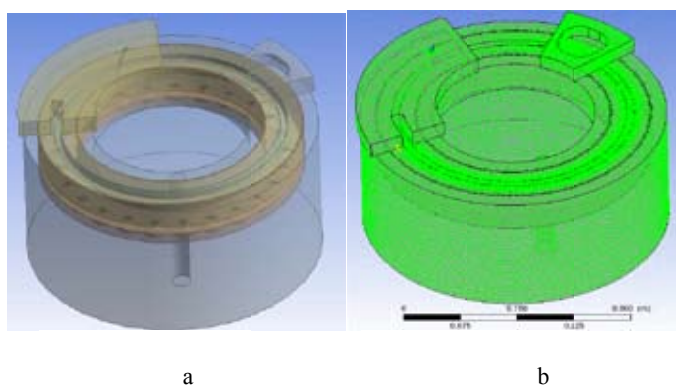


Рис. 2. Трёхмерная компьютерная модель установки НЛиП: а – геометрия установки; б – расчётная сетка контрольных объёмов

Fig. 2. Three-dimensional computer model of the CC&P installation: a – the geometry of the installation; b – calculated grid of reference volumes

строится в автоматическом режиме по следующим правилам: между доменами внутри расчетной области узлы стыкуются по правилу «узел-в-узел».

Размер ячейки внутри доменов «GROOVE» и «GROOVE 2», содержащих жидкую фазу, составляет 0,8 мм. Пристеночный слой размещается при помощи 10 ячеек на расстоянии 2 мм от стенки с коэффициентом роста 1,2. Конфигурация сетки внутри домена с жидкой фазой подбиралась минимальной.

В остальных областях размер ячейки не фиксируется. На всех поверхностях задается пограничный слой из трех ячеек на расстоянии 1 мм от стенки. В домене кристаллизатора задается сгущение сетки в месте контакта с обрабатываемым металлом. На основе полученной сеточной модели создается расчётная модель путём наложения граничных и начальных условий, параметров моделируемых процессов и задания настроек решателя.

При определении параметров надёжной работы установки НЛиП с водяной системой охлаждения был добавлен домен «WATER 1», соответствующий змеевику, расположенному на дугообразном сегменте, и содержащий 382000 элементов. Домены «WATER 2» и «WATER 3» соответствуют кольцевым профилированным каналам, расположенным в корпусе на внутренней и внешней стороне относительно подшипников, и состоят из 135000 и 102000 элементов соответственно.

Домен «GROOVE» и «GROOVE 2» (рис. 3) описывается при помощи модели несжимаемой жидкости, решается система уравнений Навье-Стокса для ламинарного течения жидкости и уравнение теплопроводности. Причём в объёме домена «GROOVE 2» задаётся выделение объёмного источника теплоты в зависимости от температуры обрабатываемого сплава (теплота, выделяемая от пластической деформации). На поверхности домена «GROOVE 2» задаётся поверхностный источник теплоты (теплота, выделяемая от трения о стенки кристаллизатора и дугообразный сегмент).

В модели дополнительно задаются функции, определяющие теплофизические характеристики обрабатываемого расплава в зависимости от его текущей температуры: теплопрово-

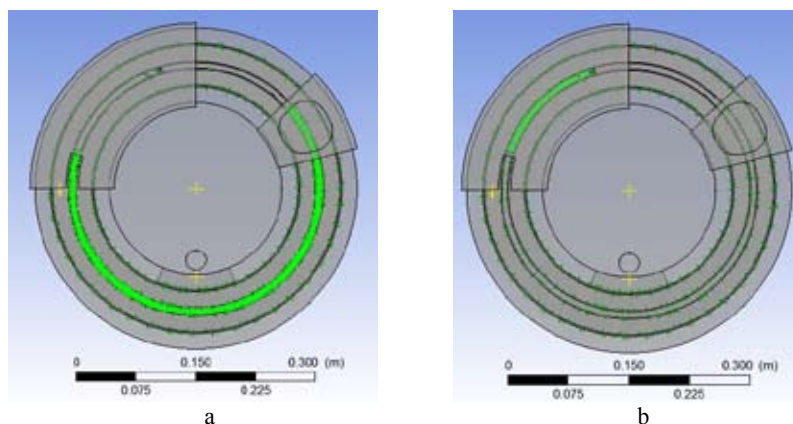


Рис. 3. Домены компьютерной модели: а – «GROOVE»; б – «GROOVE 2»

Fig. 3. Computer model domains: a – «GROOVE»; b – «GROOVE 2»

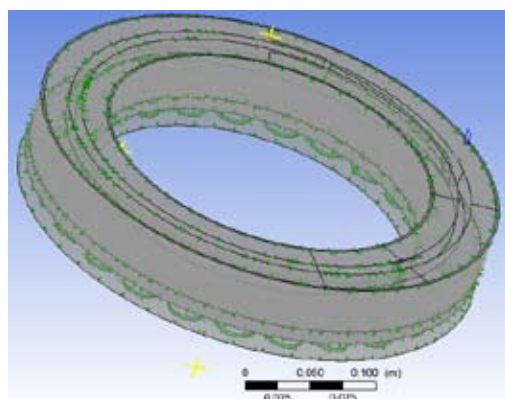


Рис. 4. Результат наложения граничных условий в компьютерной модели

Fig.4. The result of imposing the boundary conditions in the computer model

дность, теплоемкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения. При этом функциональная зависимость учитывает изменение теплоемкости и теплопроводности расплава при выделении скрытой теплоты его фазового превращения.

В результате наложения на расчётную модель граничных и начальных условий, она приобретает вид, представленный на рис. 4 (здесь отсутствует корпус, подставка и дугообразный сегмент).

Математическая модель теплообмена представляет собой систему дифференциальных уравнений сохранения энергии. Уравнение энергии включает члены, отвечающие за внутреннее тепловыделение при обработке сплава в процессе кристаллизации и прессования. Для моделирования переноса хладагента решаются уравнения Навье-Стокса, сохранения массы и импульса.

Нелинейное трехмерное уравнение сохранения энергии для обрабатываемого металла и элементов установки записывалось в виде субстанциональной производной:

$$\rho_i c_i(T) \frac{DT_i}{d\tau} = \rho_i c_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial \tau} + \rho_i c_i(T) w_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \nabla(\lambda_i(T) \nabla T_i) + q_{\text{вн}i}, \quad (1)$$

где $T_i = T_i(x, y, z, \tau)$ – поле температур в i -м элементе; ρ_i , c_i и λ_i – плотность, объёмная теплоёмкость и теплопроводность i -го элемента; w_i – скорость движения i -го элемента вдоль оси Z ; $q_{\text{вн}i}(x, y, z, \tau)$ – внутреннее тепловыделение при фазовом переходе в i -м элементе.

Уравнение (1) дополняется краевыми условиями:

- начальными условиями, определяющими начальное распределение температуры элементов установки T_i :

$$T_i = T(x, y, z, \tau = 0) = T_{0i}(x, y, z); \quad (2)$$

- граничными условиями, формируемыми для различных граничных поверхностей Γ_i :

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_i} = \pm q_i, \quad (3)$$

где q_i – условия радиационно-конвективного теплообмена на границе поверхности i -го элемента установки Γ_i ; $q_i > 0$ – поток направлен внутрь элемента i .

В модели, согласно рекомендациям [11, 12], граничные условия третьего рода (3) записывались в следующем общем виде:

$$q_i = \alpha_i (T_{\Gamma_i} - T_{\Gamma_{i+1}(0)}), \quad (4)$$

где α_i – соответствующей данной поверхности Γ_i коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_{Γ_i} и $T_{\Gamma_{i+1}(0)}$ – температуры i -той поверхности (Γ_i) или окружающей среды (Γ_0), К.

Внутренние тепловыделения при фазовом переходе характерны для домена с металлом «GROOVE» и «GROOVE 2», для остальных элементов $q_{\text{вн}i} = 0$. Скорость движения w_i относительно оси Z присуща вращающимся элементам изучаемой системы: кристаллизатора «CRISTALLYZER» и металла «GROOVE». Для остальных элементов $w_i = 0$.

Так как расплав обрабатываемого металла проходит две теплотехнические зоны (зоны кристаллизации расплава и прессования) [13], то величина $q_{\text{вн}i}$ в уравнении (1) принимает вид

$$q_{\text{вн}i} = S'_h + S''_h, \quad (5)$$

где S'_h – внутреннее тепловыделение при фазовом переходе (учитывается при решении уравнения теплопроводности в домене «GROOVE» и «GROOVE 2»); S''_h – тепловыделение от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла (учитывается при решении уравнения теплопроводности в домене «GROOVE 2»).

В общем виде значение S'_h определяется выражением

$$S'_h = \int_{T_{\text{лиг}}}^{T_{\text{сол}}} c_p(T) dT + L. \quad (6)$$

В модели теплота затвердевания L отдельно не учитывалась, а включалась в величину эффективной теплоёмкости $c_{\text{эф}}$. Эта величина является разрывной энергетической характеристикой тепловых процессов с фазовыми переходами, зависящей в кристаллизующейся зоне от доли твёрдой фазы ψ . Принимая, что ψ зависит от локальной температуры T в условиях квазиравновесия, когда S'_h выделяется внутри интервала кристаллизации, можно записать [11, 12]

$$c_{эф}(T) = \begin{cases} c_{ж} & \text{при } T > T_{liq}; \\ c_{ж}(1 - \psi) + c_{т}\psi + L \frac{\partial \psi}{\partial T} & \text{при } T_{sol} \leq T \leq T_{liq}; \\ c_{т} & \text{при } T < T_{sol}. \end{cases} \quad (7)$$

Отметим, что для уточнения решаемой задачи в уравнение (1) вводится величина эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$, который также считается функцией доли твердой фазы ψ :

$$\lambda_{эф}(T) = \begin{cases} \lambda_{ж} & \text{при } T > T_{liq}; \\ \lambda_{ж}(1 - \psi) + \lambda_{т}\psi & \text{при } T \leq T_{liq}; \\ \lambda_{т} & \text{при } T < T_{sol}. \end{cases} \quad (8)$$

Учёт тепловыделения от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла учитывался в модели за счёт добавления объёмного источника теплоты [6]:

$$S_h'' = q_{тр} + q_d. \quad (9)$$

Здесь $q_{тр}$ – тепловыделение от преодоления сил контактного трения с неподвижным инструментом и стенками кристаллизатора (поверхностный источник тепловыделений); q_d – тепловыделение от работы пластической деформации (объёмный источник тепловыделения для прессования с боковым истечением деформируемого металла):

$$q_d = \sigma_s(T, \varepsilon, \xi)(1,45\lambda + 0,8)b^2\lambda v_0, \quad (10)$$

где λ – коэффициент вытяжки; b – ширина канавки колеса; v_0 – скорость подачи заготовки в контейнер; $\sigma_s(T, \varepsilon, \xi)$ – сопротивление деформации материала заготовки.

Теплота от преодоления сил трения определяется выражением [6]

$$q_{тр} = 4b\sigma_s(T, \varepsilon, \xi)\mu R\varphi v_0, \quad (11)$$

где R – средний радиус по ширине канавки колеса кристаллизатора; μ – коэффициент трения.

При моделировании теплообмена между корпусом и кристаллизатором (домен «SOLIDAIR») тепловой поток q_i , передаваемый через цилиндрический воздушный зазор от внешней поверхности кристаллизатора к внутренней поверхности корпуса, определяется по уравнению (4), где величина α_i имеет вид

$$\alpha_i = \lambda_b / \delta_3 + \varepsilon_{пр} C_0 \frac{[(T_{Г1} / 100)^4 - (T_{Г2} / 100)^4]}{(T_{Г1} - T_{Г2})}. \quad (12)$$

Здесь λ_b – теплопроводность воздуха; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты системы из двух поверхностей (корпуса и кристаллизатора); C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; δ_3 – ширина воздушного зазора; $T_{Г1}$ и $T_{Г2}$ – температуры кристаллизатора и корпуса.

При оснащении установки водяной системой охлаждения дугообразного сегмента (Домены «WATER 1», «WATER 2» и «WATER 3») величина α_i представляет собой коэффициент теплопередачи $K_{охл}$, определяемый по соотношению

$$\alpha_i = K_{охл} = \frac{1}{1 / \alpha_{дс} + \delta_{дс} / \lambda_{дс} + 1 / \alpha_{вод}}, \quad (13)$$

где $\delta_{\text{дс}}$ и $\lambda_{\text{дс}}$ – толщина и коэффициент теплопроводности материала дугообразного сегмента; $\alpha_{\text{дс}}$ и $\alpha_{\text{вод}}$ – соответственно коэффициент теплоотдачи от затвердевшего металла к поверхности дугообразного сегмента и от внутренней поверхности змеевиков к воде.

Отметим, что перенос теплоты внутри твердых тел (Домены «CORPUS», «CRISTALLYZER», «MATRIX», «PODSTAVKA» и «INSULATOR») описывается в модели уравнением теплопроводности.

Результаты моделирования

Оценка адекватности модели проведена путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на установке с горизонтальным кристаллизатором без принудительного охлаждения ее элементов. Исследовался процесс НЛиП сплава алюминия АК-12.

В расчетах расплав с массовым расходом 9 г/с заливается в кристаллизатор при температуре 750 °С (граничное условие Inlet) через дозатор с диаметром выходного сечения 1,8 мм (в данной модели не рассматривается), установленный на зафиксированной относительно корпуса подставке. В граничных условиях Outlet задается выход затвердевшего алюминия из модели с соответствующим расходом. Направление вращения кристаллизатора по часовой стрелке. Температура окружающей среды составляет 20 °С. Расчетный коэффициент теплоотдачи конвекцией от внешних поверхностей в окружающую среду, за исключением зеркала расплава, составляет 10 Вт/(м²·К).

Вращающийся кристаллизатор переносит затвердевающий расплав до дугообразного сегмента с матрицей. Для моделирования этого процесса в компьютерной модели задается вращение обрабатываемого металла. При этом используется модель подвижной стенки путем учета в каждой пристеночной ячейке вектора скорости, соответствующего темпу вращения 2 об/мин. Для кристаллизатора и изоляционного слоя задавался аналогичный по величине и направлению вектор скорости, моделируя, таким образом, их вращение.

Для исследуемого теплового процесса граничные условия третьего рода (3) формируются в соответствии со схемой, представленной на рис. 5, для поверхностных границ Γ_i в осевых направлениях Z и X поперечного сечения установки.

На схеме индексы i в координатах Z_i и X_i указывают на соответствующую поверхность Γ_i и условия ее теплообмена в установке:

- 0, 1, 2, 3 и 4 в направлении Z представляет теплообмен между соответственно корпусом и окружающей средой (Z_0), корпусом и подшипником (Z_1), подшипником и кристаллизатором (Z_2), канавкой кристаллизатора и расплавом (Z_3), кристаллизатора с расплавом и окружающей средой (Z_4);
- 1, 2, 3 и 4 в направлении X представляет теплообмен между соответственно канавкой кристаллизатора и расплавом (X_1), кристаллизатором и корпусом через воздушную прослойку (X_2 , X_3), корпусом и окружающей средой (X_4).

Таким образом, для приведенных выше граничных поверхностей Γ_i значение α_i в уравнении (4) определялось или как линейное, учитывающее только конвективную составляющую теплообмена (поверхности Z_1 , Z_2 , Z_3 , X_1 , X_3), или как нелинейное, учитывающее конвективную и лучистую составляющие теплообмена (поверхности Z_0 , Z_4 , X_2 , X_4). В по-

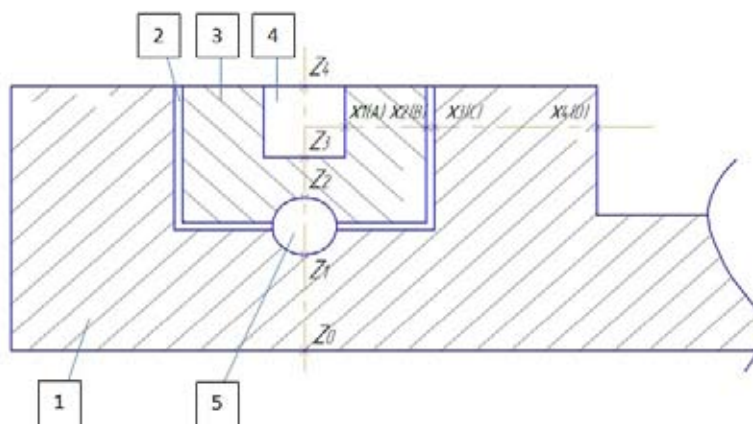


Рис. 5. Схема к определению в модели граничных условий: 1 – корпус; 2 – воздушный зазор между корпусом и кристаллизатором; 3 – кристаллизатор; 4 – канавка кристаллизатора с расплавом; 5 – подшипник

Fig. 5. Scheme to determine the boundary conditions in the model: 1 – housing; 2 – air gap between the body and the crystallizer; 3 – crystallizer; 4 – the groove of the crystallizer with the melt; 5 – bearing

следнем случае α_i представляет собой сумму коэффициентов теплоотдачи конвекцией $\alpha_{i,k}$ и излучением $\alpha_{i,l}$:

$$\alpha_i = \alpha_{i,k} + \alpha_{i,l} = \alpha_{i,k} + \epsilon_{\text{нр}} C_0 \frac{[(T_{r1}/100)^4 - (T_{r2}/100)^4]}{(T_{r1} - T_{r2})}. \quad (14)$$

В результате моделирования определено изменение температуры каждого из элементов установки в процессе её работы. На рис. 6 изображено распределение расчетной температуры элементов установки при достижении стационарного теплового режима. Видно, что наибольший прогрев корпуса происходит в месте контакта с дугообразным сегментом (рис. 6с). Связано это со значительным тепловыделением в этом элементе установки за счет пластической деформации металла и сил контактного трения. При этом определено, что в процессе работы проектной конструкции установки без принудительного охлаждения ее элементов температуры дугообразного сегмента и обрабатываемого металла превышают точку солидуса для сплава АК-12. В результате металл непосредственно перед прессованием под дугообразным сегментом находится еще в жидкой фазе, что нарушает технологический процесс.

Полученные при численном исследовании сложного теплообмена в установке НЛиП результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [13], подтверждают адекватность компьютерной модели и возможность отработки на ней инженерных решений. Так, например, при моделировании литья-прессования сплава АК-12 угол затвердевания расплава φ_s спустя 75, 155 и 218 с от начала работы установки составил соответственно 40, 74 и 116°. При проведении эксперимента в том же временном интервале этот угол равнялся соответственно 33, 57 и 97° (рис. 7).

Расхождения в изменении угла затвердевания φ_s между экспериментом и расчётом главным образом связаны с тем, что при моделировании точка солидуса определялась во

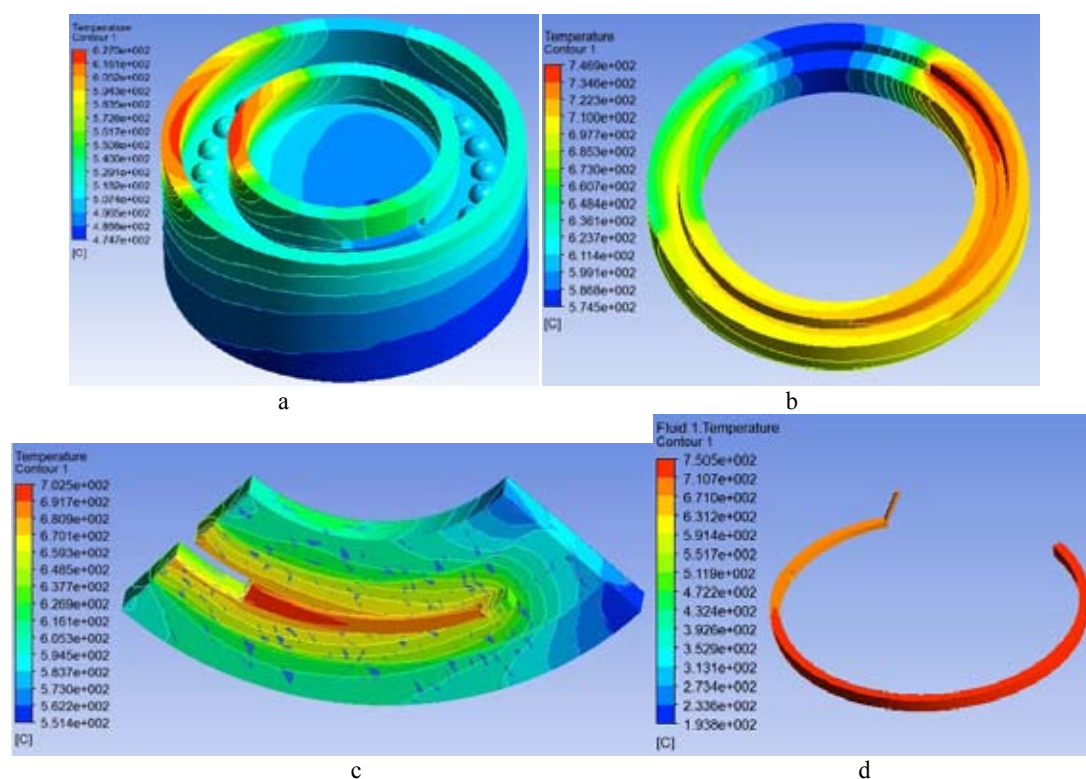


Рис. 6. Распределение температуры в элементах установки после ее выхода на стационарный тепловой режим: а – корпус; б – кристаллизатор; с – дугообразный сегмент; d – обрабатываемый сплав

Fig. 6. Distribution of temperature in the elements of the plant after its release on stationary thermal conditions: a – housing; b – crystallizer; c – arcuate segment; d – processed alloy

всем сечении кристаллизующегося металла, а не локально при измерении температуры термопарой в ходе эксперимента. Кроме того, следует учитывать погрешность термометра с аналоговым выходом ($\pm 1,5$ %) и определённую тепловую инерционность хромель-алюмелевой термопары.

Заключение

Разработана динамическая компьютерная трехмерная модель установки НЛиП, учитывающая условия сложного теплообмена между её элементами и наличие хладагента для отбора от них избытка теплоты, движение горизонтального кристаллизатора и поступающего расплава, зависимость его теплофизических характеристик от температуры, а также образование теплоты при фазовом переходе от преодоления сил контактного трения и деформации металла.

Определены температуры элементов установки после выхода ее на стационарный тепловой режим. Показано, что эксплуатация конструкции экспериментальной установки без принудительного охлаждения сопровождается значительным перегревом ее элементов при выходе на стационарный тепловой режим. В результате нарушается технологический процесс НЛиП, что требует разработки эффективной системы охлаждения наиболее теплонапряженных участков установки.

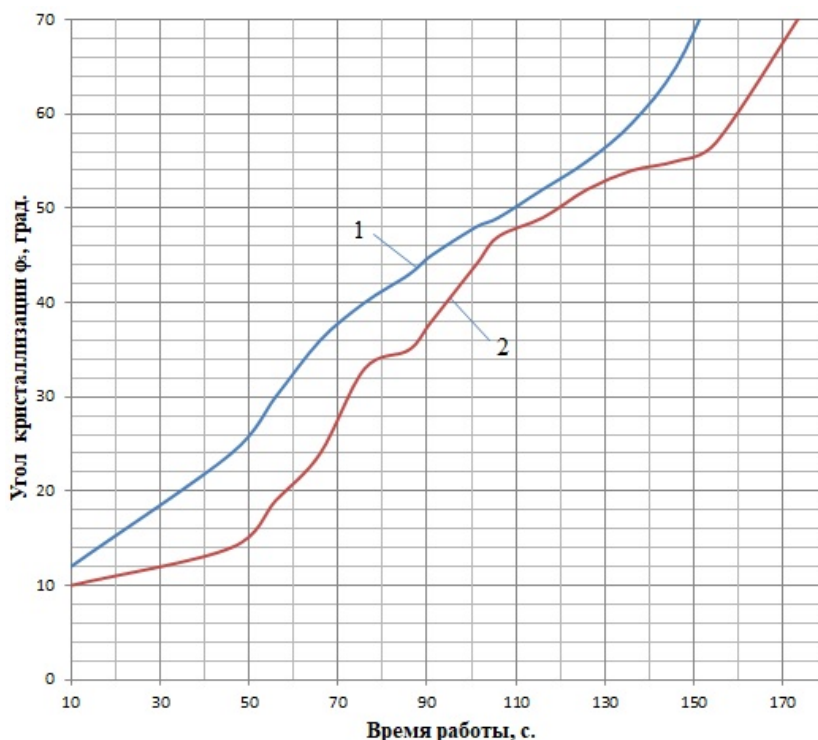


Рис. 7. Динамика изменения угла затвердевания φ_s расплава АК-12: 1 – расчет; 2 – эксперимент

Fig. 7. Dynamics of the solidification angle φ_s of the melt of AK-12: 1 – calculation; 2 – experiment

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных показали адекватность разработанной компьютерной модели и возможность отработки на ней инженерных решений.

Список литературы

[1] Бережной В.Л. *Базовые технологии и оборудование будущего в производстве пресс-изделий*, Технология легких сплавов. 2006, 1-2. С. 52–60. [Berezhnoy V.L. *Basic technologies and future equipments for producing of press-products*, Technology of light alloys. 2006. 1-2. P. 52-60 (In Russian)]

[2] Баузер М., Зауер М., Зигерт К.М. *Технология прессования металлов*, пер. с немецкого. М., АЛЮСИЛ МВ и Т, 2009. 918 с. [Bauzer M. Zauer M., Zigert K.M. *Technology of pressing of metals*, translated from German, М., ALUSIL MV & T, 2009. 918 p. (In Russian)]

[3] Duncas H.F. Continuous copper casting and rolling. *Metals and Materials*. 1972. V. 6. 2. P. 102.

[4] Grzyb R., Misiolek Z. The experimental investigations on the Force Parameters and metal flow in the combined process of Rolling and Extrusion. *Archiwum Hutnictwa*. 1983. 3. Vol. 28. P. 321–340.

[5] Бережной В.Л. Щерба В.Н., Батурин А.И. Прессование с активным действием сил трения. М., Metallurgy, 1988. 296 с. [Berezhnoy, V.L., Scherba V.N., Baturin A.I. *Pressing with strong effect of friction*. М., Metallurgy, 1988. 296 p. (In Russian)]

[6] Довженко Н.Н., Беляев С.В., Сидельников С.Б., [и др.]. *Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография*. Красноярск: Сиб. федер.

ун-т, 2009. 256 с. [Dovzhenko N.N., Belyaev S.V., Sidelnikov S.B., etc. *Pressing of aluminum alloys: modeling and management of heat conditions: monograph*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2009. 256 p. (In Russian)]

[7] Stebunov S., etc. Development and industrial verification of Q-Form-Extrusion program for simulation profile extrusion. *Proceeding of International Conference of Extrusion and Benchmark*, Dortmund, Germany. 2009. P. 41–42.

[8] Скуратов А.П., Махов Д.И., Павлов Е.А. Компьютерное моделирование и оптимизация процесса литья слитков платины. *Журнал Сиб. федер. ун-та. Серия Техника и технологии*, 2014. 7(1). С. 96-102. [Skuratov, A.P., Makhov D.I., Pavlov E.A. Computer modeling and optimization of process of casting of platinum bars. *Journal of Siberian Federal University, Technique & Technologies*, 2014. 7(1). P. 96-102 (In Russian)]

[9] Горохов Ю.В., Солопко И.В., Константинов И.Л. Основы проектирования конструктивных параметров установки непрерывного литья-прессования металла. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2009. 3. С. 20–23. [Gorokhov, U.V., Solopko I.V., Constantinov I.L. Fundamentals of designing of constructive parameters of equipment of continuous casting and pressing of metals. *Bulletin of G.I. Nosov MSTU*. 2009. 3. P. 20–23 (In Russian)]

[10] Скуратов А.П., Потапенко А.С., Горохов, Ю.В. Исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования алюминия в переходном режиме. *Журнал Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2017. 10 (3). С. 337-345. [Skuratov, A.P., Potapenko A.S., Gorokhov U.V. Investigation of heat work of equipment of continuous casting and pressing aluminum in transition mode. *Journal of Siberian Federal University. Technique & Technologies*, 2017. 10 (3). P. 337-345 (In Russian)]

[11] Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А. [и др.]. *Стальной слиток, В 3 т. Т. 1. Управление кристаллической структурой*. Мн., Беларуская навука, 2000. 583 с. [Samoilovich U.A., Timoshpolskiy V.I., Trusova I.A., etc *Steel bar: in three volumes. Vol. 1. Management of crystal structure*. Minsk: Belorussian science, 2000. 583 p. (In Russian)]

[12] Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. *Теплофизика металлургических процессов*. М., Металлургия, 1982. 240 с. [Lisienko V.G., Lobanov V.I., Kitaev B.I. *Thermophysics of metallurgical processes*. М., Metallurgy, 1982. 240 p. (In Russian)]

[13] Потапенко А.С., Скуратов А.П., Горохов Ю.В. Динамика затвердевания алюминиевого сплава при нестационарном тепловом режиме установки непрерывного литья и прессования. *Вестник Иркутского гос. техн. ун-та*, 2017. 21 (7). С. 109-118. [Potapenko, A.S., Skuratov A.P., Gorokhov U.V. Dynamics of solidification of aluminum alloy under nonstationary heat mode of equipment of continuous casting and pressing. *Bulletin of Irkutsk National Research Technical University*, 2017. 21(7). P. 109–118 (In Russian)]